

Metodología para la determinación de pérdidas en un turbogenerador de 22,2 MVA.

José L. Oslinger G.^{*a} , Harold J. Díaz M.^{*a}

(a) Grupo de Investigación en Conversión de Energía "CONVERGÍA"
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
^{*}oslinger@univalle.edu.co

(Recibido: Junio 30 de 2006 - Aceptado: Octubre 6 de 2006)

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de la validación del modelo de pérdidas en vacío en el núcleo del estator y por secuencia inversa en el rotor de un turbogenerador usando simulaciones mediante el Método de Elementos Finitos "MEF". Basados en cálculos analíticos y resultados de ensayos de turbogeneradores se determina una expresión para una corriente equivalente de armónicos que produzca los mismos efectos sobre el rotor que la corriente de secuencia inversa.

PALABRAS CLAVE: Turbogeneradores, Desbalance de corriente, Armónicos, MEF, Pérdidas.

Methodology for the determination of losses in a 22.2 MVA turbo-generator.

ABSTRACT

This article presents the results of the no-load losses model evaluation in the stator core and by inverse sequence on a turbo-generator rotor by using simulations through the Finite Elements Method "FEM". Based on analytic calculations and results from tests on turbo-generators, an expression is determined for an equivalent harmonic current, producing the same effects upon the rotor as the inverse sequence current.

KEYWORDS: Turbo-generators, current imbalance, harmonics, MFE, losses.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los fenómenos que determina la eficiencia y la vida útil de un turbogenerador son las pérdidas en régimen permanente del estator y del rotor.

En este artículo se presenta la validación del modelo de pérdidas del estator y el rotor MEF de un turbogenerador de 22.2 MVA. Las pérdidas en el estator se comparan con los resultados del ensayo de vacío en sitio realizado según la IEC 60034-2. Las pérdidas en el rotor se hallan mediante simulaciones MEF según la norma IEC 60034-4 y se comparan con las pérdidas en el rotor calculadas por diseño donde se tiene en cuenta una función derivada de ensayos de múltiples generadores.

Igualmente, se presentan los efectos de las corrientes inducidas en los rotores de los turbogeneradores, ya sean de corriente inversa o armónica. Se determina una expresión para transformar las corrientes armónicas en una corriente de secuencia inversa. Al final se obtiene un factor derivado de ensayos de varios turbogeneradores en un rango de 22 a 1300 MVA donde se demuestra que las pérdidas no son proporcionales a la raíz de la frecuencia.

2. PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO DEL ESTATOR

En [1] se validan los parámetros en estado estable y transitorio de un turbogenerador, en este apartado se valida el modelo de pérdidas en el estator y en el rotor. En el estator las pérdidas se determinan mediante simulaciones MEF y se comparan con el ensayo de vacío en sitio.

2.1. Método del cálculo de pérdidas por flujo alterno [2, 3]

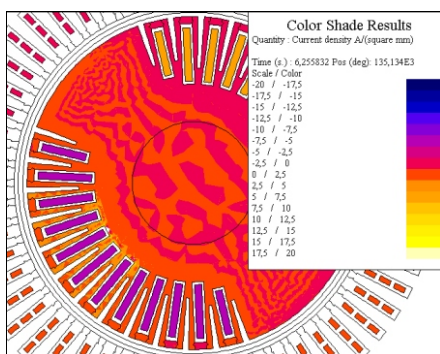


Figura 1 Densidad de corriente durante la prueba de vacío en un turbogenerador

De acuerdo al modelo usado, las pérdidas en el hierro se pueden separar en tres: pérdidas por histéresis, pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas adicionales. Flux usa la formula número 1 para el cálculo de la densidad de pérdidas.

$$\frac{\Delta P}{K_f} = \frac{\pi^2 * \sigma * d^2}{6} (B_m * f)^2 = B_m^2 * f * K_h + 8.67 * (B_m * f)^{3/2} * K_e \quad (2)$$

Donde:

K_h Coeficiente pérdidas por histéresis ($WsT^{-2}m^{-3}$)

K_e Coeficiente pérdidas adicionales ($W(Ts^{-1})^{-3/2}m^{-3}$)

σ Conductividad del material (Sm^{-1})

d Ancho de la laminación (m)

f Frecuencia (Hz)

B_m Valor pico de la densidad de flujo (T)

K Coeficiente de llenado ($0 < K_f < 1$). Este coeficiente considera el aislamiento eléctrico de las láminas del núcleo magnético.

Acondicionando la ecuación 1 tenemos:

$$dP_{\text{moy}} = \left[K_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^{3/2} * 8.67 \right] K_f \quad (1)$$

De los datos reales de la prueba de vacío con pérdidas, se extraen las pérdidas: mecánicas, que se pueden considerar como constantes (149 kW), las pérdidas óhmicas en el devanado de excitación (referidas a la temperatura de la prueba), y quedan las pérdidas en el acero del estator (ver figura 2).

Para dos corrientes de excitación se realizan las simulaciones de vacío, de esta se extrae el valor pico promedio de densidad de flujo en el estator ($B_1=0.5$ y $B_2=1$ T). De la figura 2 se toman las pérdidas reales para igual corriente de excitación ($P_1=1.86$ y $P_2=6.38$ kW), y con los siguientes

valores: $\sigma = 4822130$, $d = 0.5$ mm, $f = 50$ Hz y $K_r = 1$, se reemplaza en la ecuación 2, obteniendo un sistema de ecuaciones 2x2, que al solucionarlo arroja los siguientes valores de $k_e = 12.577$ y $kh = 62.37$

En la figura 1 se presentan los resultados de la densidad de corriente durante la simulación de la prueba de vacío y en la figura número 3 la curva real de pérdidas en el estator versus la hallada por simulaciones.

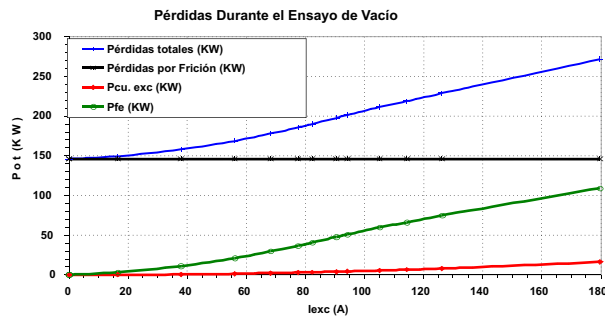


Figura 2. Pérdidas durante la prueba de vacío

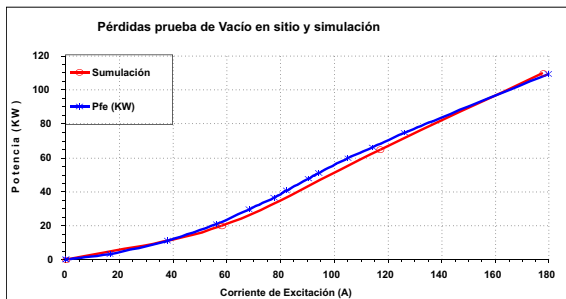


Figura 3. Pérdidas estator prueba de vacío versus simuladas

3. PÉRDIDAS EN EL ROTOR.

3.1. Efecto de las corrientes de secuencia inversa y armónicas en los turbogeneradores.

Es bien conocido que en las máquinas síncronas conectadas a líneas largas no transpuestas o durante el funcionamiento en régimen desbalanceado se crea un campo de secuencia inversa o negativa que gira en sentido contrario al giro del rotor e induce una fuerza electromotriz f.e.m. del doble de la frecuencia de la red en el rotor e impulsa corriente de orden respectivo.



Figura 4. Falla en el anillo de retención debido a las corrientes circulantes.

La corriente de secuencia inversa en el rotor debido al efecto pelicular fluye por: la superficie del núcleo de éste, las barras amortiguadoras, las cuñas de cierre (en muchos diseños las cuñas de cierre sirven de barras amortiguadoras) a través del contacto metal-metal hacia la parte interior del aro de retención y una pequeña porción que penetra el devanado de excitación.

En función de la magnitud y del tiempo de circulación de las corrientes de secuencia inversa en el rotor, válido para corrientes armónicas, se producen pérdidas cuyo efecto térmico localizado depende de las características de los materiales, del área y la presión de contacto. Debido a la alta densidad de pérdidas se puede superar puntualmente temperaturas admisibles en el área de contacto produciendo la fusión de los materiales. Si este fenómeno no se detecta a tiempo puede resultar en un fallo (ver figura 4).

Las corrientes armónicas que aparecen superpuestas en los circuitos del rotor, generan calentamiento en la superficie y componentes de alta frecuencia en el par mecánico.

Tabla N° 1. Efecto de un convertidor de seis pulsos en máquinas rotativas.

Orden del Armónico	Secuencia en la Red	Frecuencia en el Estator Hz	Orden del Armónico en el Rotor
5	-	300	6
7	+	420	6
11	-	660	12
13	+	780	12
17	-	1024	18
19	+	1140	18
23	-	1380	24
25	+	1500	24

El calentamiento por corrientes inducidas de alta frecuencia, más allá de los límites admisibles por el rotor, resulta en dos modos de fallo, primero las ranuras o las cuñas se sobrecalientan hasta el punto donde se recosen lo suficiente para romperse, y segundo, los aros de retención se expanden y flotan libres del cuerpo del rotor.

Es importante calcular las pérdidas en éste debidas al campo de secuencia inversa para determinar la resistencia de secuencia inversa del rotor "R₂".

La tabla 1 resume para un sistema de 60 Hz, el orden del armónico de corriente, la secuencia en la red, la frecuencia de la f.e.m. autoinducida en el estator y la frecuencia de la f.e.m. inducida en el rotor.

3.2. Cálculo analítico de pérdidas en el rotor debido a las corrientes de secuencia inversa.

La importancia del cálculo, desde el punto de vista del diseño, es que se puede incluir información de ensayos de un gran número de alternadores dados por los fabricantes, simplificando los cálculos

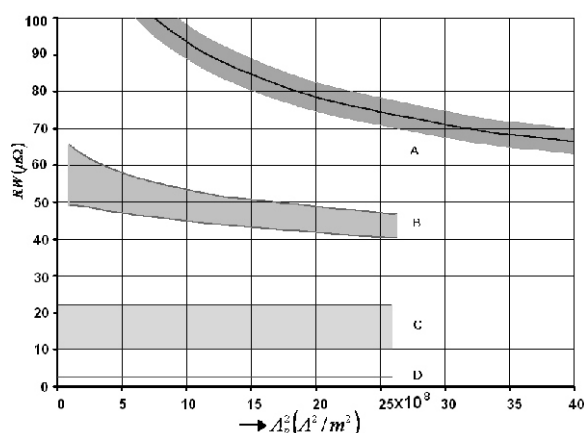


Figura 4 Determinación de la resistencia de onda RW. A) Rotor de acero macizo B) Rotor anisotrópicos C). Rotor Isotrópicos y D) Rotor de cobre macizo

Para el diseño de la resistencia de secuencia negativa dos fabricantes han determinado el factor R_w que es un parámetro derivado del ensayo de más de 50 turbogeneradores y es denominado resistencia de onda del rotor [4].

Con la impedancia base Z_n , usada de manera general en el diseño de turbogeneradores, y la resistencia de secuencia negativa R_2 en p.u., se

determina la resistencia de secuencia negativa en óhm. Para el cálculo de las pérdidas en el rotor se debe sustraer la resistencia del estator.

$$Z_n = 24 \mu_0 f w^2 k_{dev}^2 \frac{D_r + \delta}{\delta k_c} \frac{L}{(2P)^2} \frac{1}{X_{ad}} \quad (\Omega/\text{fase}) \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{12}{2} W^2 K_{dev}^2 \frac{L}{D_r \pi} R_{\omega} \quad \Omega/\text{fase} \quad (4)$$

2.3. Simulación del efecto de las corrientes de secuencia inversa en turbogeneradores.

En este apartado se simula el funcionamiento de un turbogenerador bajo carga desbalanceada, se calculan sus componentes de secuencia, teniendo en cuenta los límites establecidos por norma de máxima corriente de fase (95 y 105 % corriente nominal) y un máximo de corriente de secuencia negativa (10 % corriente nominal) [5]



Figura 5 Densidad de pérdidas en el rotor debido al desbalance de corriente

Primero se analiza el caso cuando se mantiene constante el factor de potencia y se varía la magnitud de la corriente por fase. Finalmente se analiza un caso extremo donde se varía ángulo y magnitud de una fase. En la tabla No 2 se muestran los resultados de las pérdidas obtenidas para una determinada corriente de secuencia negativa y con éstas se calcula R_2 .

Adicionalmente, para comparar con la R_2 de simulación, se calcula la R_2 de diseño a partir de las pérdidas de diseño a condiciones nominales.

Tabla 2 variación de la magnitud de la corriente por fase y sus componentes de secuencia

	I_2	Pérdidas Rotor Simuladas (W)	Pérdidas Rotor Calculadas diseño (W)	R_2 (Ω) simulación	R_2 (Ω) diseño
1	1.15	52	93290	0,1842	0,1950
2	2.5	330		0,1910	
3	3.26	605		0,1933	
4	29.9	7050		0,1942	

4. ARMÓNICOS DE CORRIENTE EQUIVALENTES A LA CORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA I_2 .

Debido a la tendencia actual de operar los materiales ferromagnéticos con mayor grado de saturación, el aumento continuo de la contaminación armónica originada por cargas no lineales como los convertidores electrónicos de potencia y los enlaces en DC, se crea la necesidad de determinar la capacidad real de las máquinas de polo liso para soportar los efectos de las corrientes armónicas.

Aunque es conocido que el efecto de las componentes armónicas de las corrientes sobre el rotor es similar al del campo de secuencia inversa, el relé 46 no es sensible a estos y de no detectarse a tiempo pueden producirse daños en el rotor.

Al considerar los efectos sobre el rotor debido a la corriente de secuencia inversa como el originado por una corriente de armónica de segundo orden, se tiene indirectamente una referencia ampliamente aceptada y normada como punto de partida para cuantificar el efecto de corrientes de frecuencia superior.

El procedimiento más acertado para determinar una corriente de armónicos equivalente a la corriente de secuencia negativa sería tomar una muestra representativa de turbogeneradores en una amplia gama de potencias de los principales fabricantes y someterlos a ensayos de laboratorio, alimentar por el estator de manera controlada un contenido armónico predeterminado y monitorear el calentamiento del rotor, posteriormente producir el mismo calentamiento con corriente de secuencia negativa. Debido a los altos costos de

este procedimiento se recurre a modelos y simulaciones, y aún así, es dispendioso y costoso.

La ecuación número 5 determinada en [6] determina una corriente equivalente de armónicos que produzca los mismos efectos sobre el rotor que la corriente de secuencia inversa.

$$I_{2eq} = K \sqrt{(i_5^2 + i_7^2) \sqrt{3} + (i_{11}^2 + i_{13}^2) \sqrt{6} + (i_{17}^2 + i_{19}^2) \sqrt{9}} \dots \quad (5)$$

Donde: I_5, I_7, I_{11}, I_{13} es la magnitud en p.u de las corrientes armónicas que circulan por el estator. K es el coeficiente de transformación de pérdidas en el rotor y se determina de acuerdo a la gráfica No.6.

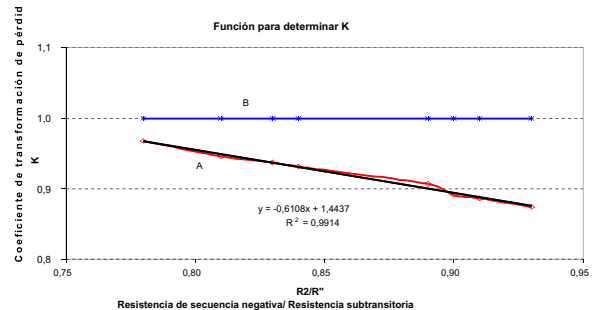


Figura No.6 Curva para determinar el coeficiente K. A) Método Propuesto, B) Método Clásico

Donde:

El valor de R_2 corresponde al valor de la resistencia de secuencia negativa determinada con rotor parado. IEC 60034-4 numeral 49.

El valor de R'' corresponde al valor de la resistencia subtransitoria determinada con rotor parado. IEC 60034-4 numeral 45.

El sentido físico de K considera las asimetrías propias de cada turbogenerador, esto significa que las pérdidas realmente no son proporcionales a la raíz de la frecuencia. El coeficiente ajusta a diferentes frecuencias la transformación de las pérdidas debidas a las corrientes inducidas en el rotor de los turbogeneradores. Incluye la variación de la resistividad del rotor con la temperatura y los fenómenos de saturación porque los ensayos se realizan con corrientes elevadas, incluyen el efecto de las asimetrías de diferentes formas de ranuras y devanados amortiguadores, especialmente en las zonas de contactos del anillo de retención con las cuñas de cierre ya que los ensayos se realizan con la máquina girando.

La anterior función se construye con base en los datos de ensayos reales de ocho turboalternadores, se seleccionaron de diferente tipo de rotor, voltaje, frecuencia y potencias entre 35 MVA y 1250 MVA. Incluyendo el que es objeto de este estudio, entre otros [4, 7].

Con esta nueva función (curva A figura No 6), se observa un error hasta del 14% si se considera la relación clásica de r_1/r_2 (curva B), igual a 1/.

Donde:

r_1 es la resistencia de los circuitos equivalentes del rotor referida a los bornes, bajo un ensayo a frecuencia nominal y rotor parado.

r_2 es la resistencia equivalente de los circuitos del rotor al campo de secuencia inversa, referido a los bornes del generador.

Con esto se determina que la pérdidas por armónicos en el rotor son:

$$P_{\text{armonicos}}^{\text{totales}} = I_{2.\text{equi}}^2 * R_2 \quad (2)$$

Para el cálculo de pérdidas en el rotor y siendo un potencial práctico del método es que se tiene la ventaja que al determinar la corriente de armónicos equivalente a la corriente de secuencia negativa se puede utilizar resistencia de secuencia negativa r_2 bajo ensayo normalizado.

5. CONCLUSIONES

- Con información del ensayo real de un turbogenerador se pueden determinar las constantes de pérdidas y lograr reproducir la característica de pérdidas en el núcleo del estator mediante simulaciones MEF.
- Determinar el valor de resistencia de secuencia inversa de un turbogenerador mediante simulaciones MEF, es un procedimiento dispendioso que fue posible debido a información disponible de diseño de muchos generadores.
- Bajo carga desbalanceada, aunque la variación de la corriente de secuencia negativa y cero es pequeña, su efecto sobre la densidad de

corriente en el rotor es considerable y, tal como se esperaba, es más notorio en la cara polar, conduciendo al aumento del calentamiento del rotor.

- Basados en cálculos analíticos y resultados de ensayos de turbogeneradores se determina una expresión para una corriente equivalente de armónicos que produzca los mismos efectos sobre el rotor que la corriente de secuencia inversa.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. J. Oslinger, H. Díaz, *Determinación de parámetros de un turbogenerador por medio del laboratorio virtual simplificado y el método de elementos finitos "lvs-mef"*, CIURRE, 2006.
- [2]. Cedrat, *How to determine iron losses coefficients*, April de 2005.
- [3]. F. Fiorillo, A. Novikov, *An improved Approach to power losses in magnetic laminations nonsinusoidal induction waveform*. IEEE Transactions, Vol. 36, sep 1990.
- [4]. I.M. Canay, *Calculation of Negative-Sequence Losses and Negative-Sequence Resistance of Turbogenerator*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, Pág 764-773, No.3, May/Jun 1975.
- [5]. ANSI C50. 14-1977, *American National Standard Requirements for Cylindrical-Rotor Synchronous Generators*, reaffirmed 1989.
- [6]. J. Oslinger, *Adendo a la norma Técnica Colombiana NTC 3998*, revisión de 2006.
- [7]. G. Neidhoefer, *The significance of a damper in turbogenerator rotors brow bovery review*, Volume 61, pág 192-198, May 1974.